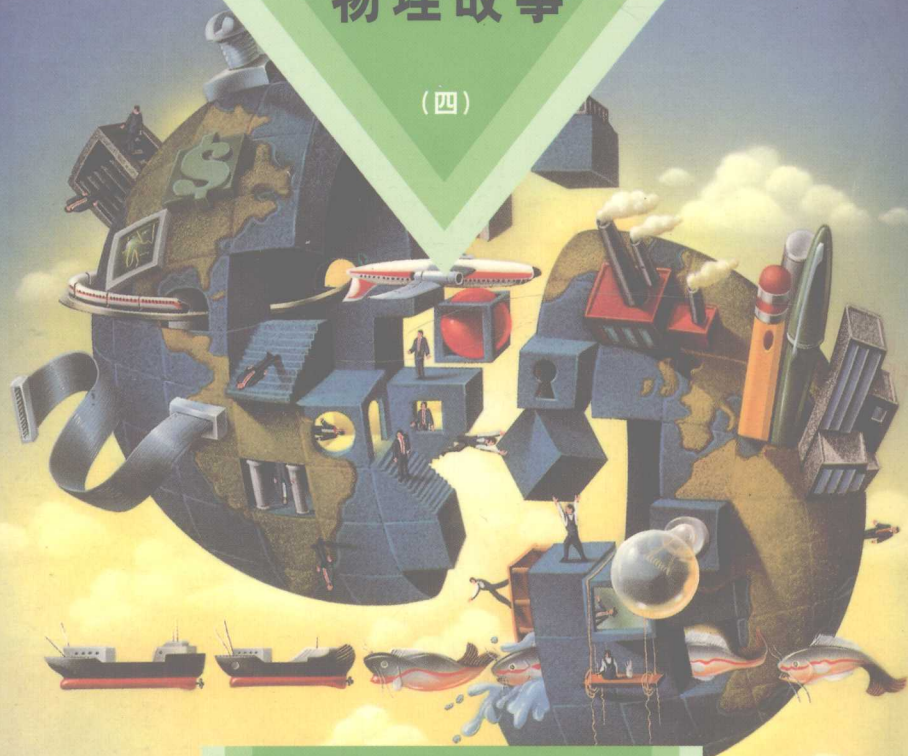


SHIJIE JINGDIAN KEXUE GUSHI

世界经典科学故事²⁰

物理故事

(四)



本书编写组 编

中国和平出版社

N49

358/(4)

故事

物理故事

(四)

本书编写组 编

中国和平出版社

德布罗意的联想

1924 年秋天,英国皇家学会权威刊物《哲学杂志》刊登了一篇无名之辈的文章,却震撼了世界科坛。

这篇文章明确提出一个假设,认为爱因斯坦所讲的波粒二象性不是光子才具有的,它也适用于一般的完全物质,即一切微观粒子。对于这种“二象性”,作者名之为“物质波”。其观点的新颖、独创,推理的严密、准确,都是无懈可击的。这种大胆的假设,立刻在科学界激起一个巨大的波澜,但论文的作者只是一个当时在物理学家中几乎不为人知道的法国青年学者路易斯·德布罗意。

路易斯·德布罗意出身于贵族家庭。到了他的祖父这辈,因为承袭了曾祖一辈的爵位,坐享荣华富贵,便无所建树,毕生默默无闻。

早在路易斯少年时期,父母亲就相继逝世了。此后,他就在哥哥莫里斯·德布罗意的抚养与教育下成长。莫里斯是一位卓越的实验物理学家,X 射线方面的初期经典研究的创始人之一,他不但承担了父亲的责任,而且对其弟关怀备至,从而对路易斯走上物理学研究道路产生非常大的影响。

在中学读书时,路易斯的兴趣是文科。18 岁时就取得了历史学学士学位,直到 20 岁那年,在其兄的启发下他的志趣才转向物理学。在此期间,他普遍涉猎了自然科学名著。其



中法国物理学家、数学家庞加莱的著作《科学的价值》、《科学与假设》，对他颇有启发。从庞加莱的著作中，他了解到人应该怎样为科学事业而奋斗，假设在科学领域中不管有着多么重要的意义。莫里斯在巴黎拜伦路上宫殿似的家庭里建有一个私人实验室，路易斯便兼任哥哥的物理实验助手。

路易斯的治学原则是：广见闻，多阅览，勤实验。他认为环境与出身不能决定一个人的志向，重要的是在学术上要善长独立思考，不迷信权威名流。就是对那位比他大 17 岁的哥哥，只要在学术上发生了争论，他也毫不留情面，有时居然弄得哥哥面红耳赤。当时他俩讨论最多的课题之一是关于 X 射线的波动性和粒子性。他在自己的晚年回忆说：“经过长时间的孤寂的思索和遐想之后，在 1923 年我忽然想到：爱因斯坦在 1905 年所作出的发现，应当加以推广，把它扩展到一切物质粒子，尤其是电子。”

这一年，德布罗意着手解决因为光的波粒二象性所造成的困境。根据所有干涉和衍射实验可知，光是由电磁波组组成的；但是，根据光和物质进行的各种能量交换时，它又是粒子性的。两种观点都由大量的实验佐证。一切较早一些的实验结果显示了波动性，而一些最近的实验结果又都表明光具有粒子性。一部分最近的数据就来自他哥哥的实验室；并且，有些实验是在他亲自协同下完成的。怎样去统一看来是如此矛盾的两个方面呢？

德布罗意是从爱因斯坦光的波粒二象性思想中受到非常大的启发。他想，光辐射具有粒子性，而物质粒子为何不可以具有波动性呢？长时间以来，在光学上，与波动的研究方法相比，过去忽视粒子的研究方法了。但在物质粒子的理论上，人



们却反其道而行之,太忽视波动的图像了。他认为在研究物质粒子的理论中,必须“同时引进粒子概念和周期性概念”。他大胆设想,不但光有粒子和波动两种性质,而且“一般的”物质同样也具有这两种性质。这就是说,既然粒子概念在波的领域里成功地解释了使人疑惑的康普顿效应,那么,波动概念也应能解释粒子领域里令人困惑的定态概念。

在这些思考的基础上,德布罗意于1923年9月10日,发表了题为《波和粒子》的论文。他指出爱因斯坦的公式 $E = h\nu$ 不适用于光子,而该适用于电子。就是说,素来被人看做是粒子的电子,也应该具有波动的性质。他把电子假设为波,用波形轨道代替圆形轨道,让电子从圆周上的某点为起点出发,边振动边绕周。为了绕一周后能回到原来的位置,处于原状,这就得巧妙地调节它的波长,即周长除以它的小长为一整数,也就是玻尔理论中的量子化条件。在该基础上,他把 $E = h\nu$ 与爱因斯坦相对论的推论 $E = mc^2$ 相结合,创造了物质波的理论。即 $p = h/\lambda$,其中 h 为普朗克恒量, p 为物质的动量, λ 为其波长。由此可得出物质波的波长,由下式表示:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

这就是著名的德布罗意公式。他还提出,应该把玻尔理论中的量子化条件解释为有关物质波的陈述:玻尔给出的电子轨道长度应是伴随着电子的物质波波长的整数倍,存在的轨道表示物质波的驻波形式,而在其他禁止的轨道上,物质波因为干涉而消失。这样就阐明了可以用物质波的概念来解释玻尔提出的轨道量子化的条件。

9月24日,德布罗意发表了题为《光量子,衍射和干涉》



的论文,引入了相位波概念。在谈到粒子波动现象的实验验证可能性时,他预言:“一束电子穿过非常小的孔也许产生衍射现象,这可能是实验上验证我们想法的方法。”

同年10月8日,德布罗意具体地给出了关于几何光学和经典力学的类比。他认为传统力学只不过是一种近似,它与几何光学的适用范围一样。他感到有必要建立一种新的动力学——波动力学,并且指出:“关于自由粒子的新的动力学和旧的动力学之间的关系,完全同波动光学和几何光学之间的关系相同。”

1924年,德布罗意总结了上述三篇短论文,并加以缜密的证明,形成了他的博士论文《关于量子理论的研究》,于11月25日在索邦学院的审定委员会上答辩了这篇博士论文。

和历史上多次发生过的事情一样,德布罗意有关物质波的极为大胆的假设发表后,起初并没有引起物理学界的重视。索邦学院也是如此,当收到德布罗意的博士论文后,因为不知道怎样进行估价而处境尴尬,导致作出的部分评议是:“我们赞扬他以非凡的能力坚持作出的为克服困扰物理学家的难题所必须作出的努力”,最后在场的评委教授只得以“相信”的结论通过这篇博士论文。

在此之前,德布罗意的老师朗之万将论文的副本寄给了好友爱因斯坦。爱因斯坦收到后,立刻看出了这位青年学者所提出的物质波假设的极其重要性,真有些喜出望外,马上回信表示赞赏。同时写信给玻恩,建议他也读一读这篇别有风趣的,看起来好像是不合理的,然而却是独具一格的论文。由于爱因斯坦的决定性支持与推荐,德布罗意有关物质波的假设受到了国际物理学界的普遍重视。于是,很快全文刊登在



皇家学会的《哲学杂志》上。

为何物质波的假设提出竟会使很多有名望的科学家感到难以捉摸呢？这是由于物质波与人们以往所熟悉的水波、声波、光波、电磁波以及其他实实在在的，并能通过感觉器官或者仪器记录下的各种类型的波，是根本不一样的。

因为德布罗意的物质波大大超出了科学家们当时的思维空间和认识水平，在这些科学家的眼里就认为德布罗意的假设是离经叛道，太神秘了。但是，德布罗意坚信：任何物体包括大至一个行星，一块石头，小至一粒灰尘或一个电子，这些客观存在的物质，能够在真空中传播的现象，决不是机械波，同样也不是电磁波，而是一种崭新的未被认识的波。由于没有物质，就谈不上有什么波，因此德布罗意把这种“不可想像”、“玄而又玄”的“神秘波”叫作“物质波”。

物质波的假设提出使很多科学家处境尴尬的另一原因在于：我们为何看不见德布罗意波。但是，一般说来我们怎样才能觉察出波来呢？不能只凭借我们的感觉器官，因为人的感觉器官毕竟还有较大的局限性，比如人耳只能听到频率介于20至16000周/秒的声音，而人眼只能反应波长介于0.4至0.8微米的可见光波。于是科学家们通过发明各种仪器来不断扩大人的感觉范围。

现在已明白，被假设的德布罗意的波长范围是十分广阔的。既然如此，为什么长时间以来人们却没有发现这种波呢？问题在于：怎样去发现。机械波，波长有几米，便能被人耳察觉。但一台收音机，即使调谐到这声波的波长也不能接收到它，因为收音机只能接收无线电波。从另一角度来看，无线电波不能被人耳或其他机械装置接收到，即使它的波长约几米。



这就是说,任何一种接收器只能对某种特定类型的波作出反应。耳反应声波,眼反应电磁波。由此可见,人们又怎么察觉德布罗意波呢?德布罗意波不但不属于声波这一类,同样也不属于电磁波这一类。

然而,人们还是想方设法要去察觉德布罗意波。这里,先让我们根据德布罗意公式: $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$,看一看我们四周的物体运动是和怎样的波长相对应的。

(1) 地球的波长

地球的质量是 6.0×10^{24} 千克,环绕太阳的轨道速度大约为 3×10^4 米/秒,根据德布罗意公式,普朗克恒量 $h \approx 6.60 \times 10^{-34}$ 焦耳·秒,可以求得地球的波长。

$$\lambda = \frac{6.6 \times 10^{-34}}{6.0 \times 10^{24} \times 3 \times 10^4} \text{ 米} = 3.6 \times 10^{-59} \text{ 米}$$

这个数值是现在还没有任何一个能用来作比较的有确定意义的量,它到底会小到什么程度,推测任何现有的以及未来几十年也许拥有的最精密的仪器,也无法记录下这样小的数值,真小得使人奇怪,是不是隐含着深一层次的奥秘?

(2) 一块石头的波长

一块石头质量为 1 千克,飞行速度为 1 米/秒。根据德布罗意公式能够求出,石块运动时的波长。

$$\lambda = \frac{6.6 \times 10^{-34}}{1 \times 1} \text{ 米} = 6.6 \times 10^{-34} \text{ 米}$$

这个波长的数值比一个原子核的线度还小 1 千亿亿倍。可是原子核本身已经远远超过了显微镜所能观察的范围,所以目前要用仪器观察到这样短的波也是没法做到的。



(3) 电子的波长

电子的质量为 $m = 0.91 \times 10^{-30}$ 千克, 带电量为 1.6×10^{-19} 库仑, 经过 200 伏特的电势差加速该电子, 加速后电子得到动能 $E = Ve = 200 \times 1.6 \times 10^{-19}$ 焦耳 $= 3.2 \times 10^{-17}$ 焦耳。

根据 $\frac{1}{2}mv^2 = E$, 电子的速度是 $v = \sqrt{\frac{2E}{m}}$, 代入数字可得出 $v = 8.4 \times 10^6$ 米/秒。

按照德布罗意公式求出, 这个运动电子的波长为

$$\lambda = \frac{6.60 \times 10^{-34}}{0.91 \times 10^{-30} \times 8.4 \times 10^6} \text{ 米} = 8.7 \times 10^{-11} \text{ 米}$$

这个数字就大不一样了。 8.7×10^{-11} 米几乎相当于 X 射线的波长, 而后者是可以被测出的。所以, 在理论上, 我们应该可以测出电子的德布罗意波。

这个理论的推测, 于 1925 年被美国物理学家戴维孙的电子衍射实验所证实。戴维孙于 1911 年获得了普林斯顿大学的博士学位, 第二年被卡内基理工学院任命为物理学助理教授。1917 年转入西部电气公司的工程部队从事研究工作, 成绩卓著。

实际上, 电子束在晶体上的衍射早在德布罗意的假设提出之前就已发现。1921 年, 戴维孙与助手康斯曼在实验中曾偶然发现, 当电子在薄镍片上散射时, 能够观察到强度和散射角度有明显的依赖关系, 但对于这个奇特的实验结果, 他们没有领悟到是一种衍射现象。后来, 戴维孙花了大约两年的时间继续这项研究, 设计和安装了新的仪器设备, 还用不同的金属材料作靶子。工作虽没有多大进展, 但却为以后的实验研究作了技术准备。



1925年,戴维孙和助手革末又开始了电子散射实验。一次偶然的事件让他们的工作得到了戏剧性的进展。正如他们的论文指出:

“在进行这项工作时,因为靶子有很高的温度,盛有液态空气的容器爆炸了。试管被炸碎,进入的空气使镍靶氧化了。后来,氧化物被还原,靶子上面的一层薄膜也用蒸发的办法去掉了,是在氢气中及真空中、在不同的高温下长期的加热后才去掉的。

“当实验继续进行的时候,散射电子按角度的分布全部变了。变化的情况能用曲线示出。……曲线是在事故发生之后得到的,是首次看到的新曲线。这种散射的明显变化曾被认为是因为长时间的加热过程使靶子发生了再结晶而造成的。在事故发生之前,我们轰击过大量的小晶体,事故发生之后,我们只轰击了几个(实验上约10个)大晶体。”

也就是说,看到新曲线中发现了好几处尖锐的峰值,他们即采取措施,把管子切开,发现镍靶在修复的过程中发生了改变,原来磨得极光的镍表面,现在看来构成了一排大概10块明显的结晶面。他们断定出现新的散射曲线的原因就在于原子重新排列成晶体阵列。

这一极其重要现象的出现,促使戴维孙和革末立刻修改他们的实验计划。特意制作了一块大的单晶镍,并切取一特定方向来做实验。先后花了近一年的时间,制成了新的镍靶和管子。他们为熟悉晶体结构做了许多X射线衍射实验,拍摄了很多X射线衍射照片,可就是没有把X射线衍射和他们正从事的电子衍射联系在一起。这样他们于1926年继续做电子散射实验的过程中,并没有立刻重获偶然事故之后的那



种曲线。

1926年夏天,戴维孙出席了在牛津大学召开的英国科学促进会。在那里,他和玻恩、弗兰克等人讨论了他的电子散射的研究。通过讨论,戴维孙意识到他实验中出现的新曲线这一重要结果恰恰是因为晶格的电子衍射造成的,这就证明了德布罗意的假设。

于是,戴维孙回到纽约之后,马上和革末一起,更自觉地投入到找寻电子波的实验证据的全面研究中去。从该年12月起,经过两三个月的紧张工作,便从实验中获取了卓著成果,即实验所得的数据表明,德布罗意公式: $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$ 在测量准确度范围内是正确的。

1927年3月,他们提出了一个研究结果的初步摘要,全文报告则于12月发表在《物理评论》上。此文系统地记述了电子衍射的实验方法、实验经过和实验结果,首次确定了运动电子的波动性,其波长与德布罗意物质波的假设相同。

电子不但在晶体上散射时表现出波动性,当电子束穿过一薄金属箔后,再照射到一屏上时,在屏上就显现出有规律的条纹,也表现出波动性。这些条纹和X射线通过晶体粉末时所发生的衍射条纹是很相似的。这说明电子也和X射线一样在通过晶体后有衍射现象,并且从晶格常数、加速电位差和条纹的几何图形等,都证实了电子衍射时的波长和按德布罗意所预言的物质波的波长完全吻合。

电子衍射实验的成功,再次庄严地宣告:德布罗意的假设全部正确!从此,物质波的观念为一切的物理学家全面接受,并成为量子力学的重要基础。

爱因斯坦的发展

1905年6月,在伯尔尼专利局工作的一位青年科学家发表了一篇名为《论动体的电动力学》的论文。这篇论文由于逻辑的完美和思想的深邃,尤其是以全新的观点解决了当时物理学进展中的难题,并引起了物理学界的极大重视。这位年仅26岁的青年科学家很快便成为科学革命的一位举世闻名的旗手,物理学界的一颗璀璨夺目的新星,他就是爱因斯坦。

爱因斯坦在专利局干得非常出色。他作为三级技术专家,虽然年薪只有3500瑞士法郎,却已经能维持生活,而且这个工作迫使他作多方面的思考。一旦有了休息的时间,他就用于物理学的研究,并在笔记纸上演算复杂的数学公式。但是他一听见上司的脚步声音,就把纸匆忙地塞进抽屉里。

进行了整整5周的紧张研究,爱因斯坦终于把经过10年酝酿的见解,形成了论文,提出了不同凡响的狭义相对论。正如美国物理学家佩斯指出:“狭义相对论是经历10年的酝酿才诞生的。然而作者(指爱因斯坦)在悟出这个理论最关键、最重要的运动学见解之后,不到五六周的时间便在讨论的过程中实际完成了论文。这件事是从爱因斯坦1922年12月在京都的演说中知道的。”

实际上,爱因斯坦在阿劳的那一年(即从1895年10月到1896年早秋),他已经想到这样一个问题:“如果一个人以光



速追随光波运动,他的眼睛看到的会是什么情景呢?”不久,爱因斯坦进入联邦工业大学学习,他又遇到以太、光和地球运动的问题。这些问题一直萦回在他的脑海之中,他几乎想制造一种仪器,用来精确地测定地球相对以太的运动。

后来,爱因斯坦在谈到他第一次萌发相对论想法时,曾说:“谈论我如何开始产生相对论思想是一件并不难的事。因为激发我思考的事物太多了,在相对论思想发展的不同阶段上,每一种思考所产生的影响又都不相同,……这种想法究竟从哪里开始说不太明确,但是肯定它与运动物体的光学特性有关。光在以太中传播,而地球又在以太中运动,换言之,以太在相对地球运动。”这就是说,对运动相对性的沉思、探索和研究,导致了爱因斯坦的“智力革命”。

美国杰出科学史家科恩认为,科学革命并非一个突发的、短暂的事件,而是有它自己的发展过程的。他根据4个世纪以来科学发展的重大事件的历史分析,把这个过程区分为四个阶段:智力革命、书面上许诺的革命、纸面上的革命和科学革命。所谓“智力革命”,即“自身革命”。当一位科学家(或一个科学家集团)设计出一种根本解决某个或者某一些主要问题的方案,寻找到一种利用信息的新方法,并且提出一种能以全新的方式包容现存信息的知识框架(由此导致作出没有人曾料到的预言),引入一套改变现有知识特性的概念或提出一种革命的新理论的时候,这种革命就已经出现了。总之,革命的第一步总是由一个或多个科学家在所有科学革命初期建立的。狭义相对论的创立也是如此。

爱因斯坦于1921年在伦敦皇家学院的讲话充分表达了这种思想,他说道:“我能够荣幸地在这个曾产生过理论物理



学的众多最重要基本观念的国家首都发表讲话,感到特别高兴。我想到的是牛顿所给我们的物体运动的引力理论,以及麦克斯韦和法拉第借以将物理学放到新基础上的电磁场概念。相对论实在可以说是对洛伦兹和麦克斯韦的伟大构思画了最后的一笔,因为它力图把物理学扩充到包括引力在内的一切现象。”

这就是说,相对论又产生在对麦克斯韦电磁场理论的推广之中。由于麦克斯韦理论和牛顿力学具有明显不同的特点,在物理学的发展进程中,就很自然地提出了这样的问题:运动的相对性对力学规律是适用的,那么对电磁规律是否也适用呢?

爱因斯坦依据对牛顿力学和麦克斯韦理论进行了深刻的分析之后,敏锐地指出:“当麦克斯韦电动力学应用到运动的物体上时,就会引起一些不对称,而这种不对称好像不是现象所特有的。”这里所说的不对称就是统一性遭到破坏。爱因斯坦认为这种不对称不像是自然界所固有的,因为他相信自然界具有统一性,因此问题可能出在我们以往认识自然界的理论和概念上。

牛顿说:“绝对的、真正的和数学的时间自身在流逝着,并由于它的本性而均匀地,同任意一种外界事物无关地流逝着。”“绝对空间由于它的本性,以及它与外界事物无关,它永远是等同的和不动的。”在牛顿看来,空间和时间是独立于人之外的客观存在,这明显是唯物主义的观点;然而牛顿却把空间和时间绝对化,没有看到时间和空间之间的联系,也没有看到它们与物质的联系,这是一种形而上学的看法。

爱因斯坦经过 10 年的沉思、研究发现,只要把作为经典



力学基础的绝对空间和绝对时间的概念加以适当修改,上述提到的不对称就能够消除。爱因斯坦正是在一个最简单、最平凡,也似乎是司空见惯、最不成问题的问题上找到了突破口,这也是爱因斯坦“智力革命”的最可贵之处。

实际上,人是居住在地球的表面上,因此很自然地是以地球表面为基础来确定物体的空间位置,这是与地球表面联系在一起的空间。物理学家在研究物体运动时,必须依靠参照系的选择,事实上也是用的具体空间,也就是相对于某一物体或物体系的参考空间。所以,并不存在抽象的、绝对的空间,只存在具体的、与物体相联系的空间。显然,与具体的物体相联系的空间,是相对的而并非绝对的。

绝对的时间概念,其特点是统一性与独立性。它的独立性,表现在时间不受任何其他东西的影响;它的统一性,表现为在任何参照系都有统一的时间。但是绝对时间概念的这种性质是不明确的。从麦克斯韦的电磁场理论的观点出发,因为场是以有限的速度传播的,它就不能提供不同参照系之间有同步的时间。例如对于同一个电磁波,不同惯性系测量它的频率是不同的,也就是测量它的振荡周期是不同的。这就是说,对于同一个电磁振荡,在不同的惯性系测得的时间间隔的也是不同。显然,这是对统一的时间标尺的挑战。假如没有统一的时间,承认各个惯性系有各自的时间,那么时间不受外界影响也就无法成立了,因此时间的独立性也不是绝对的了。

爱因斯坦正是在极为周密地考察空间与时间的关系中发现:“两个事件间,既没有空间的绝对关系,也没有时间的绝对关系,但是有时间与空间的绝对关系。”这便是他对时间与空



间概念的全新理解。他还发现了“同时相对性”，即两个在空间上分隔开的事件的所谓“同时”，取决于它们之间相隔的空间距离和光信号的传播速度，在静止的观察者看来却是同时的两个事件，在运动的观察者看来就不可能是同时的。这就是说，同时性的概念也变成相对的了，它与物体的运动情况有关。

根据上述的思路，爱因斯坦着手创立更为完善的理论。他在《论动体的电动力学》一文中写道：“凡是对力学方程适用的所有坐标系，对于上述光学和电动力学的定律也同样适用……我们要把这个猜想提升为公设，并且还要引进另一条在表面上看来同它相反的公设：光在空虚空间里总是以一确定的速度 c 传播着，这速度同发射体的运动状态无关。”

爱因斯坦在这里提到的两个公设，现在一般称为狭义相对论的两个基本原理。第一个狭义相对性原理是：在所有的惯性系，物理学规律都是一样的；不存在一个优于其他惯性系的绝对惯性系。第二个原理是光速不变原理：在所有的惯性系中，真空中的光速不变，都是常量 c 。

有了这两个原理，其必然的结果是否定了绝对惯性系的存在，从而也就没有“以太”存在的必要了。以太存在的假说，曾是 19 世纪经典物理学所依赖的基本假说之一。迈克耳逊—莫雷实验的零结果明确地宣告了寻找以太的失败。当时很多物理学家都不愿意看到这个事实，都不愿推翻以太的假说。然而，爱因斯坦却与众不同，他大胆地接受了这个事实，还明确宣布所谓绝对静止的“以太”的存在是“多余”的，并且把所有的“以太漂移”实验中所表现的光在真空中始终是以一确定速度传播的事实提升为一个原理，就是光速不变原理，这又是



何等了不起。

爱因斯坦发现,为了证明光速是一个恒量,人们必须接受大量出乎意料的事情:比如随着物体运动速度的增加,物体在运动方向上就会变得越来越短,直至在达到光速时,长度变为零为止;与此同时,物体的质量会变得越来越大会,在达到光速时,质量会变得无穷大。他还发现,当物体的运动速度越来越大时,在运动物体上时间流逝的速率也会逐渐减小,而在达到光速时,时间就会完全停止。所有的这些,在当时人们的脑海中简直是不可思议的,但是却真正把握了对物理世界崭新的基本认识。

狭义相对论不仅引起了时空观的革命,还带来了整个物理学的革命,在 20 世纪的人类生活中产生了深远的影响。后者最为明显的是关于物体的能量和质量相当性的推论。这是 1905 年 9 月在爱因斯坦写完了狭义相对论论文后 3 个月提出来的。

爱因斯坦发现,物体的质量就是它所含能量的量度,如果能量 E 改变了,那么质量 m 也就相应地改变 E/c^2 ,这里的 c 是光速,即

$$E = mc^2$$

这就是闻名的质能关系式,它代表质量与能量的关系。

质能相当性给了我们特别重要的启示,它说明一定的质量就代表一定的能量,质量与能量是相对的,两者之间的关系只是相差一个常数 c^2 的因子。依照质能关系式,一个处于静止状态的物体,由于它有静止质量 m_0 ,因而也就有能量 $E_0 = m_0 c^2$,这在经典物理学又是难以理解的。

尤其令人想不到的是,这样的能量其数值十分巨大。由